

文章编号:1004-4116(2023)04-0023-08

西秦岭早子沟金矿区花岗闪长斑岩地球化学特征及地质意义

代文军¹, 谢建强², 王晓伟³

(1. 甘肃省地矿局第三勘查院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省地质勘查基金管理中心, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:早子沟金矿区除发育大量的中性岩脉(闪长玢岩、石英闪长玢岩和黑云闪长玢岩)外, 还见有较多的中酸性岩脉—花岗闪长斑岩。为了解花岗闪长斑岩的成因及其与成矿关系, 对其进行了岩石地球化学的系统研究。研究表明, 样品具有较高的 $w(\text{SiO}_2)$ (65.02% ~ 67.31%)、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (15.31% ~ 17.62%)、 $w(\text{K}_2\text{O})$ (3.24% ~ 3.86%) 和较低的 $w(\text{MgO})$ (1.59% ~ 2.93%); $\sigma = 0.56 \sim 1.88$, $A/\text{CNK} = 0.94 \sim 1.08$, 属高钾钙碱性系列准铝质—过铝质花岗岩类。稀土总量中等 ($\sum \text{REE} = 132.70 \times 10^{-6} \sim 211.96 \times 10^{-6}$), 相对富集轻稀土, 轻重稀土分馏明显 ($\text{LREE}/\text{HREE} = 12.50 \sim 19.12$, $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 18.62 \sim 40.65$), 具弱的铕负异常 ($\delta \text{Eu} = 0.68 \sim 0.84$); 原始地幔标准化分布模式图显示相对富集 Rb、K、Th, 亏损 Ba、Nb、Ti 等元素。构造环境判别显示出壳型和壳幔型岩浆弧的特征。结合区域地质背景, 认为花岗闪长斑岩形成于俯冲背景下的陆缘弧环境, 与三叠纪西秦岭地区碰撞造山导致的陆壳大规模拆离及加厚上地壳的部分熔融有关。花岗闪长斑岩常与中性岩脉伴生在一起或沿同一构造带先后侵位, 其成岩时间稍早于中性岩脉, 成矿时代与闪长玢岩形成时代基本一致, 而稍晚于花岗闪长斑岩。说明花岗闪长斑岩等脉岩沿断裂构造的侵位和扩容, 为金矿的含矿流体充填、沉淀富集提供了有利的空间。

关键词: 花岗闪长斑岩; 岩石成因; 地质意义; 早子沟金矿区; 西秦岭

中图分类号: P588; P618

文献标志码: A

西秦岭西段的夏河—合作成矿带是西秦岭地区主要的贵金属和有色金属产区之一, 该区矿产时空分布具有分段成群展布的特点。空间上, 以夏河—合作断裂为界, 东北部岩浆活动较频繁, 发育金、铜、铁及多金属等矿化, 矿化受岩体接触带及不同方向断裂交汇部位控制, 矿床类型主要为接触交代(充填)—热液型、矽卡岩型和斑岩型。产有以地南金矿、老豆金矿、岗岔金矿、三索玛金矿、岗以铜矿、德乌鲁铜矿、牙日尕多金属矿、来岗卡多金属矿和美仁铁矿等。西南部岩浆活动较弱, 发育以金为主的矿化, 矿化主要受断裂破碎带控制, 矿床类型以中低温热液型和构造蚀变岩型为主。产有加甘滩、早子沟、加木龙、隆瓦寺院、杂恰勒布、桑曲、也赫杰、直合完干、完安囊、早仁道、索拉贡玛等金矿(图 1)。

早子沟金矿位于西秦岭西段夏河—合作成矿

带, 为二十世纪 90 年代中期勘查发现的大型金矿床之一。截止 2017 年底, 矿床累计提交金金属量 110 600 kg。自矿床发现以来, 先后有许多地质工作者和学者对其进行了较为深入的研究, 研究工作主要集中在矿床地质及成因^[1-3]、矿床地球化学^[4-6]、围岩蚀变与金矿化关系^[7]、中性岩脉与成矿关系^[8]、含矿岩体地球化学^[9]及成矿年代学^[10-11]等诸多方面, 并取得了一系列丰硕成果。这些研究成果为早子沟金矿成矿机制提供了可靠的地质信息。但也存在一些尚未解决的问题, 如对矿区岩浆岩的研究主要是针对与成矿密切的中性岩脉(闪长玢岩、石英闪长玢岩、黑云母闪长玢岩)做了大量的工作, 而对矿区发育的大量花岗闪长斑岩研究较少, 这在一定程度上制约了岩浆活动与成矿关系的认识。因此有必要对花岗闪长斑岩进行岩浆源区及成因、形成构造环境

收稿日期: 2023-05-14

基金项目: 西秦岭地区地质大数据找矿靶区定量预测研究(202202)、甘肃省西秦岭东段金矿大数据找矿靶区定量预测研究(2022CX18)资助

作者简介: 代文军(1974 ~), 男, 高级工程师, 研究方向为区域成矿规律及成矿预测。E-mail: daiwj1974@126.com

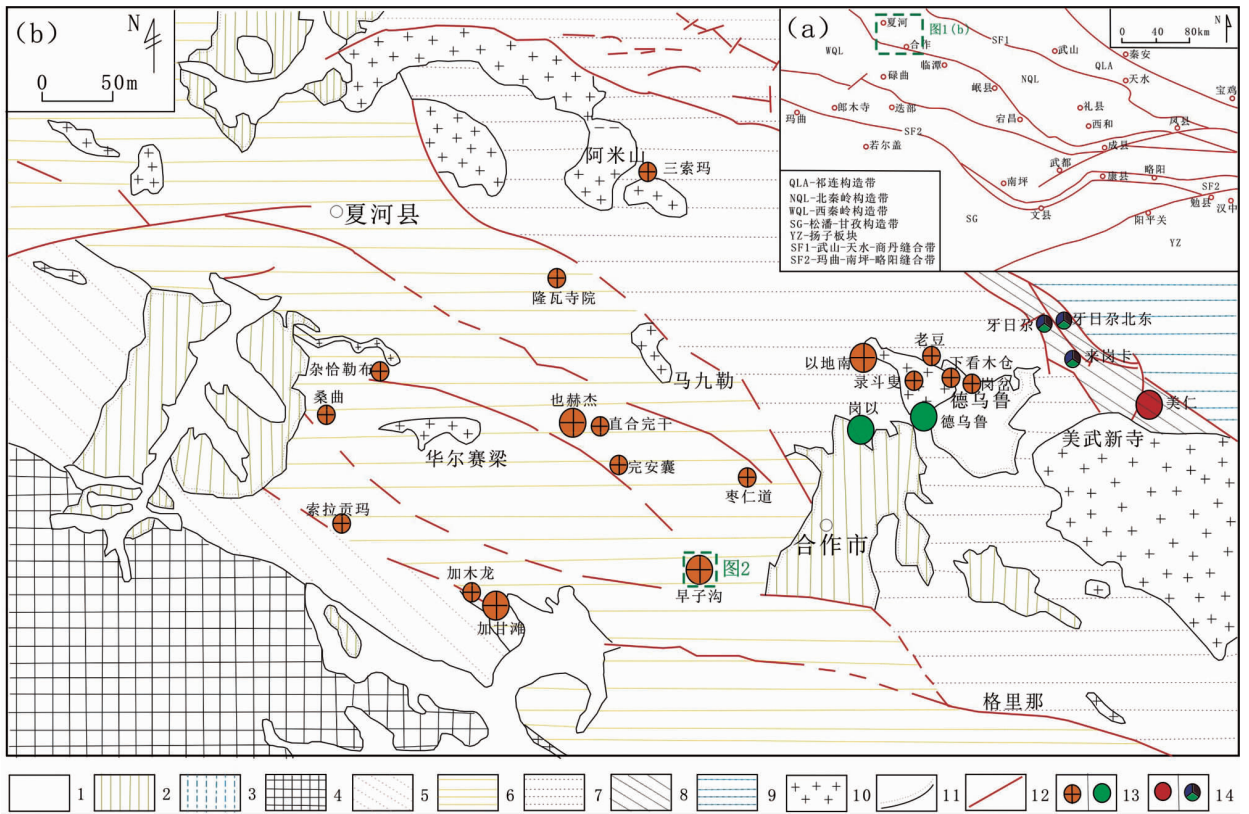


图 1 西秦岭地区构造地质简图(a)(据代文军等,2012)和夏河—合作一带地质矿产略图(b)(据刘春先等,2011,略有修改)

Fig. 1 Schematic diagram of tectonic geology(a)and sketch map of geology and mineral resources in Xiahe-Hehe area(b)

1—第四系;2—上新统甘肃群;3—中上侏罗统郎木寺组;4—上三叠统大河坝组;5—中三叠统光盖山组;6—中三叠统古浪堤组;
7—下二叠统十里墩组;8—上石炭统下加岭组;9—下石炭统巴都组;10—花岗岩类;11—角度不整合界线;
12—断层;13—金矿床/铜矿床;14—铁矿床/多金属矿床

及其与成矿关系等方面的研究,为岩浆演化过程及成矿作用提供依据。鉴于此,本文通过对矿区花岗闪长斑岩岩相学、元素地球化学的系统研究,探讨了岩浆源区及成因、构造环境及其与成矿的关系。

1 区域地质背景

西秦岭处于华北板块、扬子板块和特提斯构造域结合部,北以武山—天水—商丹缝合带(SF1)为界,南以玛曲—南坪—略阳缝合带(SF2)为界(图 1 a)。区域地层总体呈北西向展布,与区域构造线相一致,出露地层为石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、新近系和第四系。

区内岩浆活动频繁,呈岩基、岩株、岩枝或岩脉状产出。规模较大的有阿米山、马九勒、美武新寺、杂恰勒布、华尔赛梁花岗闪长岩和德乌鲁石英闪长岩,这些岩体多呈港湾状、不规则长条状(图 1 b)。区内

岩脉较发育,见有辉绿岩脉、闪长玢岩脉、花岗斑岩脉、石英脉等。

区内构造以断裂构造为主,次为褶皱构造。褶皱为新堡—力士山复背斜,属紧密线状褶皱。断裂以 NW 向为主,次为 NE 向、EW 向和 SN 向断裂,它们共同构成本区的断裂构造系统(图 1 b),对区内岩浆岩和矿化的分布具明显的控制作用。

2 矿区地质特征

早子沟金矿区位于西秦岭褶皱带北部断褶带与中部裂陷槽过渡部位^[6-8],处于夏河—合作—岷县断裂带南侧(图 1)。区内出露地层为中三叠统古浪堤组下段和第四系(图 2)。古浪堤组下段在矿区大面积出露,为一套陆源细碎屑岩建造,自下而上由粉砂质板岩→泥质板岩→钙质板岩构成一个较大的、经历造山变质改造的沉积旋回,矿区中部发育的条带

状硅质板岩、粉砂质板岩及泥质板岩为主要赋矿岩石。第四系为现代冲洪积砂、砾石沉积。

矿区构造以断裂构造为主,局部发育层间褶曲。断裂构造相互交叉,具有多次活动的特点,大致由NW向、NNW向、NE向、NNE向和近SN向五组断裂组成。在形成时间上,从早到晚依次为NW向、近SN向、NE向、NNW向和NNE向。矿体受NE向、NNW向、NW向和近SN向断裂控制明显。

矿区岩浆岩为中性、中酸性岩脉,岩石类型主要为闪长玢岩、石英闪长玢岩、黑云母闪长玢岩、花岗闪长斑岩、斜长花岗斑岩和细晶闪长岩等。具成群聚集、多期次沿断裂浅成就位的特点,岩脉与围岩接触界线清晰,产状与断裂构造一致。展布方向以NE向为主,次为近SN向,少数NW向。其产出形态和面积严格受断裂构造控制。花岗闪长斑岩主要分布在矿区东北部,以NE向展布为主,少数NW向,常与中性岩脉伴生在一起或沿同一构造带先后侵位。从矿化看,中性岩脉矿化强烈,中酸性岩脉无矿化。

花岗闪长斑岩分布于矿区东部及北部,在矿区南部有零星出露(图2),主要呈脉状产出,少数为岩状,其产出形态和面积严格受区内构造控制,对围岩的烘烤蚀变现象较弱。本次用于岩石地球化学分析的样品采自矿区露头,采取时远离花岗闪长斑岩边部,且避开蚀变部位,确保样品新鲜并具代表性。岩石具(多)斑状结构,块状构造。斑晶含量占40%,斑晶大小不等,最大者约1.0 cm,小者在1.0~3.0 mm之间。矿物成分为斜长石、钾长石、石英及少量普通角闪石、黑云母。其中斜长石呈半自形板状,聚片双晶发育,局部绿泥石化;钾长石呈半自形—它形板状,局部发生重结晶作用;石英呈它形粒状,具波状消光;普通角闪石呈半自形柱状,具褐绿—浅黄褐多色性;黑云母呈鳞片状,具多色性。基质为半自形微晶结构,粒度普遍小于0.2 mm,由斜长石(25%)、钾长石(20%)、石英(10%)、少量普通角闪石、绢云母和经蚀变形成的碳酸盐矿物(5%)组成。副矿物为榍石、锆石、黄铁矿和磁铁矿等。

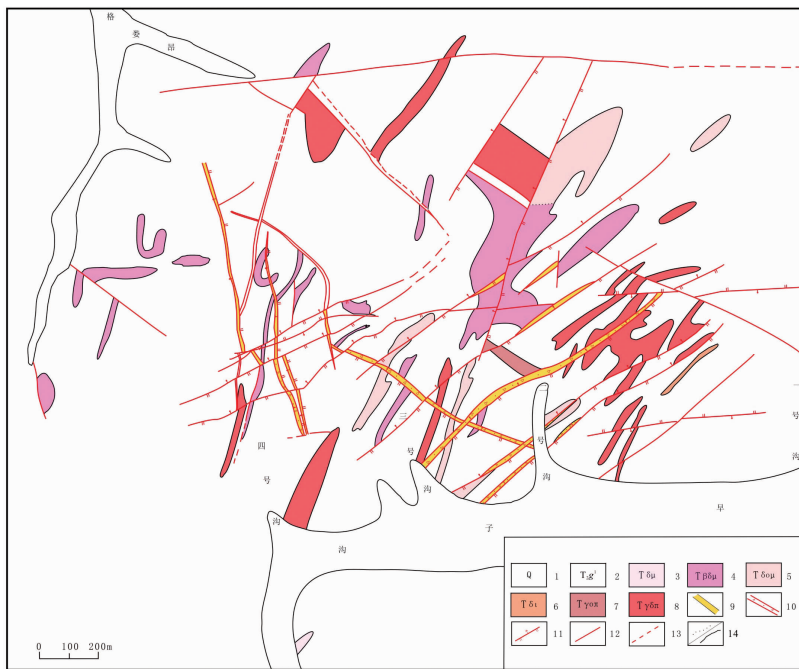


图2 早子沟金矿区地质略图(据代文军等,2012,略有修改)

Fig. 2 Geological sketch of Zaozigou gold mining area

- 1—第四系;2—中三叠统古浪堤组下段;3—三叠纪闪长玢岩;4—三叠纪黑云母闪长玢岩;
5—三叠纪石英闪长玢岩;6—三叠纪细晶闪长岩;7—三叠纪斜长花岗斑岩;
8—三叠纪花岗闪长斑岩;9—金矿体;10—断层破碎带;11—实测逆断层;
12—实测性质不明断层;13—推测性质不明断层;14—岩相/地质界线

3 测试分析结果

本次工作对矿区6件花岗闪长斑岩样品进行了主量和微量元素(包括稀土元素)分析,分析结果见表1。岩石地球化学图解利用长江大学路远发教授^[12]开发的GeoKit 2021软件制作完成。

样品的 $w(\text{SiO}_2)$ 为65.02%~67.31%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为15.31%~17.62%, $w(\text{TiO}_2)$ 为0.58%~0.69%, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为3.53%~6.43%, $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $w(\text{MgO})$ 为1.59%~2.93%。碱度率(A/R) = 1.36~1.84,碱值(A/NK) = 1.99~4.20,里特曼组合指数(σ) = 0.56~1.88,显示岩石为钙碱性;铝饱和指数(A/CNK) = 0.94~1.08,反映属准铝质—过铝质花岗岩类。在 $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解中(图3a),样品投影点位于亚碱性系列的花岗闪长岩内;在 $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{K}_2\text{O})$ 分类图解中(图3b),样品投影点位于高钾钙碱性系列区。

样品的稀土总量中等, $\sum \text{REE} = 132.70 \times 10^{-6} \sim 211.96 \times 10^{-6}$,平均为 175.09×10^{-6} 。轻稀土相对富集,重稀土相对亏损($\text{LREE}/\text{HREE} = 12.50 \sim$

表 1 早子沟金矿区花岗闪长斑岩主量元素 ($w_B\%$)、
稀土和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果

Table 1 Analysis results of major elements ($w_B\%$), rare earth
and trace elements ($\times 10^{-6}$) of granodiorite porphyry
in Zaozigou gold mining area

样号	ZZH-1	ZZH-2	ZZH-3	ZZH-4	ZZH-5	ZZH-6
SiO ₂	66.41	65.39	66.49	67.05	67.31	65.02
TiO ₂	0.59	0.64	0.58	0.63	0.62	0.69
Al ₂ O ₃	15.31	16.29	15.69	16.56	16.47	17.62
Fe ₂ O ₃	0.76	1.23	0.87	0.48	0.51	0.56
FeO	3.33	3.06	3.02	2.98	2.89	3.22
MnO	0.08	0.08	0.06	0.05	0.05	0.05
MgO	2.85	2.93	2.86	1.61	1.59	2.03
CaO	6.59	6.74	6.50	4.36	4.31	4.24
Na ₂ O	0.10	0.10	0.09	2.90	2.89	2.92
K ₂ O	3.86	3.43	3.73	3.25	3.24	3.51
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.11	0.13	0.12	0.14
Na ₂ O+K ₂ O	3.96	3.53	3.82	6.15	6.13	6.43
σ	0.67	0.56	0.62	1.57	1.55	1.88
A.R	1.44	1.36	1.42	1.83	1.84	1.83
A/NK	3.53	4.20	3.75	2.00	1.99	2.05
A/CNK	0.94	1.01	0.98	1.02	1.02	1.08
La	35	30	34	48.2	47.6	41.7
Ce	69.8	56	63	93.8	95.3	82.5
Pr	8.14	6.55	7.37	10.7	10.9	9.57
Nd	29.9	24.9	28.5	38.9	39.2	34.1
Sm	5.51	4.62	5.09	6.72	6.86	6.16
Eu	1.09	1	1.05	1.29	1.36	1.42
Gd	4.4	3.79	4.00	4.67	4.78	4.33
Tb	0.57	0.566	0.635	0.6	0.6	0.57
Dy	2.7	2.5	2.92	2.56	2.75	2.62
Ho	0.48	0.427	0.507	0.43	0.45	0.44
Er	1.18	1.08	1.35	1.05	1.05	1.04
Tm	0.16	0.17	0.22	0.14	0.14	0.14
Yb	1.01	0.96	1.31	0.86	0.84	0.88
Lu	0.16	0.14	0.18	0.13	0.13	0.14
Y	12.20	12.80	14.30	10.90	11.40	10.70
ΣREE	160.1	132.70	150.13	210.05	211.96	185.61
LREE	149.44	123.07	139.01	199.61	201.22	175.45
HREE	10.66	9.63	11.12	10.44	10.74	10.16
LREE/HREE	14.02	12.78	12.50	19.12	18.74	17.27
La _N /Yb _N	24.86	22.39	18.62	40.20	40.65	33.99
δEu	0.68	0.73	0.71	0.70	0.73	0.84
Y+Yb	13.21	13.76	15.61	11.76	12.24	11.58
K	28473.46	30963.85	32043.02	26979.23	26896.21	29137.56
Sc	7.27	6.33	8.44	5.34	5.48	6.88
P	480.11	436.46	480.11	567.40	523.75	611.04
V	40.00	36.50	51.00	32.20	32.10	39.90

续表

样号	ZZH-1	ZZH-2	ZZH-3	ZZH-4	ZZH-5	ZZH-6
Cr	50.40	28.20	52.30	20.00	24.70	32.40
Co	6.42	8.51	9.03	8.66	8.84	9.73
Ni	10.90	10.50	15.60	9.57	10.40	12.40
Rb	161.00	147	160.00	150.00	158.00	184
Sr	284.00	277	294.00	318.00	322.00	325
Nb	11.60	9.52	10.00	12.20	11.90	12.7
Ti	3 776.85	3 417.15	3 597.00	3 776.85	3 716.90	4 196.50
Cs	16.9	12.6	15.7	12.4	12.5	12.4
Ba	230	273	323	598	606	706
Ta	0.91	0.699	0.752	0.99	1	1.06
Th	13	11	11.7	17.8	18	15.3
U	2.8	2.66	2.28	4.8	4.72	4.47
Zr	161	91.2	94.8	194	186	233
Hf	4.48	3.11	2.97	5.39	5.08	6.16

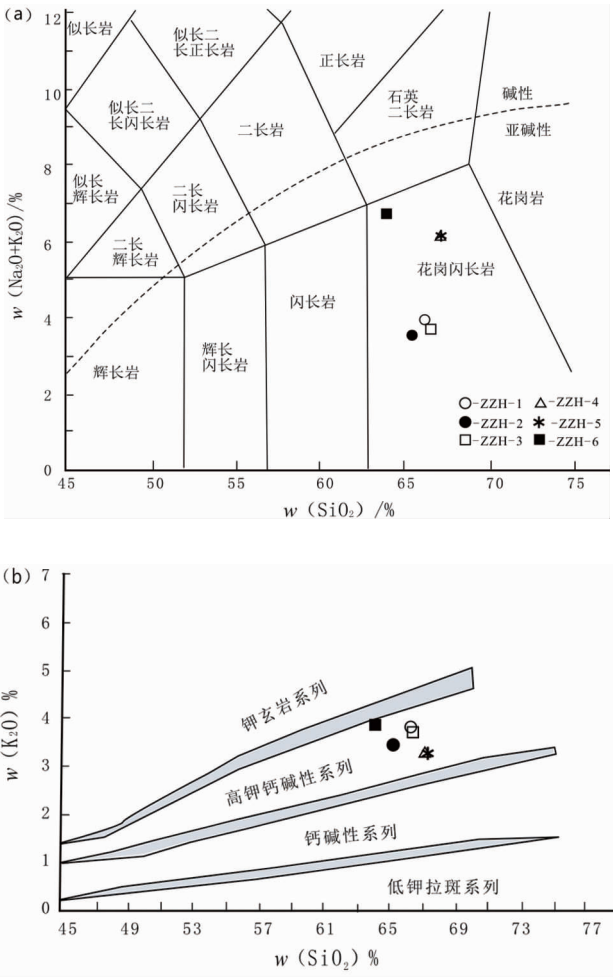


图 3 $w(\text{SiO}_2)-w(\text{NaO}_2+\text{K}_2\text{O})$ 图解 (a) (底图据Middlemost
E A K, 1994^[13], 虚线据肖庆辉等, 2002^[14]) 和
 $w(\text{SiO}_2)-w(\text{K}_2\text{O})$ 分类图解 (b) (底图据肖庆辉等, 2002^[14])

Fig. 3 Schematic diagram of $w(\text{SiO}_2)-w(\text{NaO}_2+\text{K}_2\text{O})$ (a)
and classification diagram of $w(\text{SiO}_2)-w(\text{K}_2\text{O})$ (b)

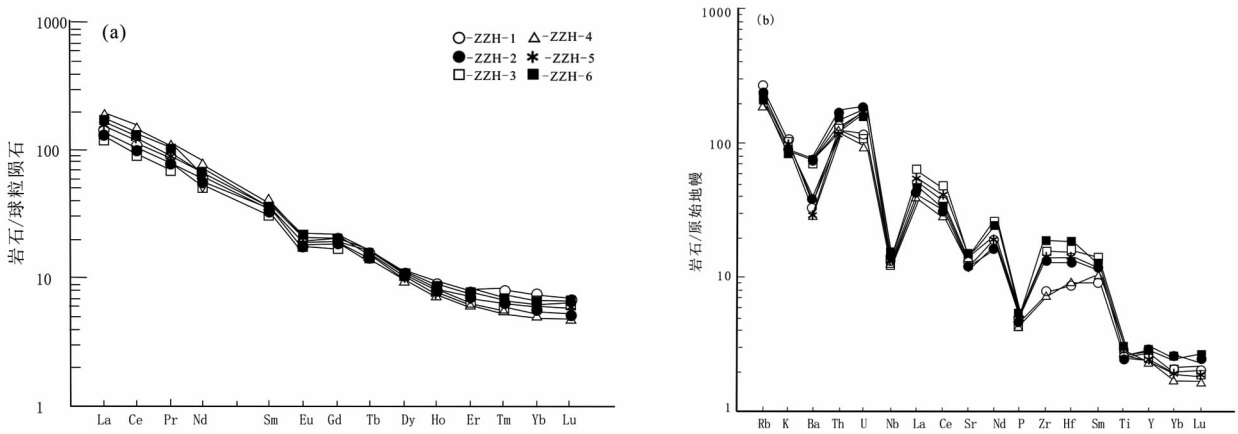


图 4 花岗闪长斑岩稀土元素配分模式(a)和花岗闪长斑岩微量元素分布模式(b)
(底图及球粒陨石值、原始地幔值据李昌年,1992)

Fig. 4 Distribution pattern of rare earth elements(a) and distribution pattern of trace elements(b)
in granodiorite porphyry

19. 12), 轻重稀土分馏明显($La_N/Yb_N = 18.62 \sim 40.65$), 具有弱铕负异常($\delta Eu = 0.68 \sim 0.84$)。在球粒陨石标准化的稀土元素组成配分模式图上, 表现为富集轻稀土、亏损重稀土和弱铕负异常的右倾曲线(图 4 a)。原始地幔标准化的分布模式图上(图 4 b), 样品呈现出相对富集 Rb、K、Th、U 等元素, 亏损 Ba、Nb、P、Ti 等元素, Zr、Hf 元素异常不明显, 显示岩浆弧花岗岩的特征^[15]。

4 讨论

4.1 岩浆源区及成因

样品的 $\delta Eu = 0.68 \sim 0.84$, 平均为 0.73, $La_N/Yb_N = 18.62 \sim 40.65$, 平均为 30.12, 反映岩石与壳幔型岩浆岩地球化学特征相似。在 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ 变异图解上(图 5)样品投影点位于壳型和壳幔型区域, 且大部分样品靠近壳型和壳幔型分界线位置, 显示出壳幔的混合。

样品的 A/CNK 值绝大多数小于 1.1 ($A/CNK = 0.94 \sim 1.08$) 和较低的磷含量 ($P_2O_5 = 0.11\% \sim 0.14\%$), 表现出 I 型花岗岩的演化趋势, 这也与秦岭地区早中生代 I 型花岗岩地球化学特征一致^[16], 认为岩石属 I 型花岗岩。

综上所述, 花岗闪长斑岩为 I 型壳幔混源岩浆成因。

4.2 构造环境分析

西秦岭造山带在印支期碰撞造山时限尚存在着

分歧。张国伟等(2001)^[17]认为, 西秦岭地区俯冲与碰撞造山为 345 Ma ~ 200 Ma; 陈衍景(2010)^[18]、徐学义等(2012)^[19]认为, 三叠纪秦岭地区处于洋陆俯冲体制向陆陆碰撞体制转变阶段, 伴随着陆壳大规模拆离、俯冲、增厚, 形成众多规模不等的花岗岩类; Dong et al. (2011)^[20]、Qin et al. (2010a)^[21] 认为, 西秦岭地区同碰撞阶段大约在 237 Ma ~ 215 Ma, 215 Ma ~ 200 Ma 为后碰撞阶段; 骆必继等(2012)^[22]认为, 西秦岭造山带在 254Ma ~ 251Ma 进入陆陆碰撞阶段。然而, 随着研究工作的不断深入, 西秦岭西段早中三叠世为俯冲背景绿岛环境的观点已被广泛认可^[23-24]。矿区 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 花岗闪长斑岩年龄为 (248.9 ± 1.4) Ma, 闪长玢岩年龄为 240 Ma ~ 233 Ma, 黑云母闪长玢岩年龄

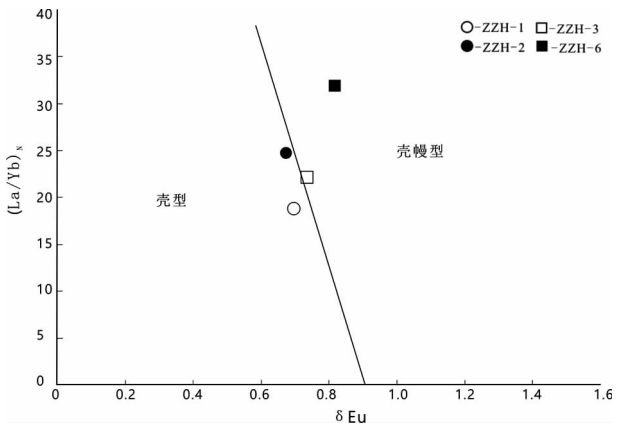


图 5 $\delta Eu-(La/Yb)_N$ 变异图解 (底图据李昌年, 1992)

Fig.5 Graphical representation of $\delta Eu-(La/Yb)_N$ variation

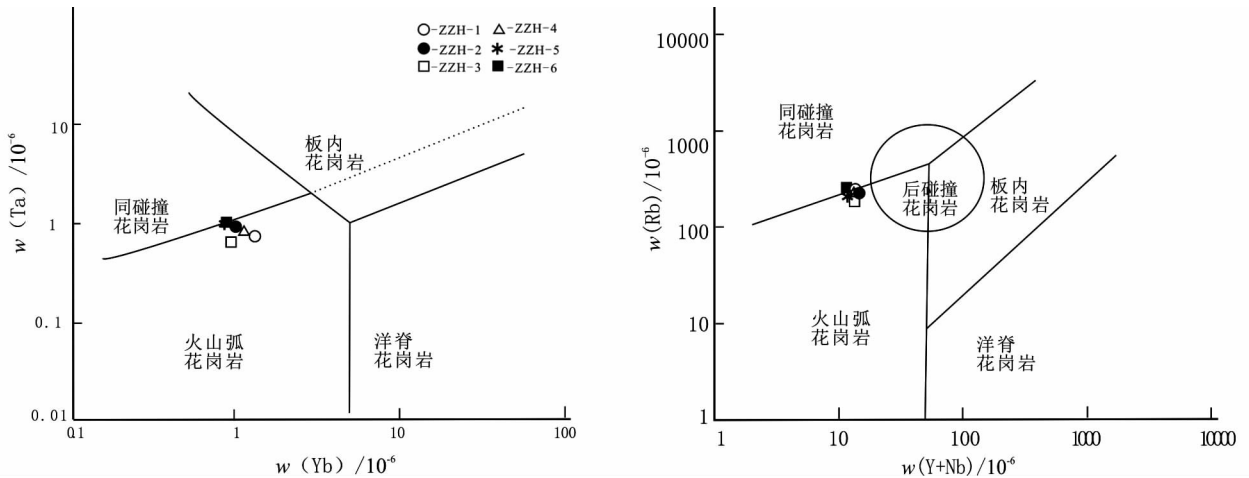


图 6 Yb-Ta和(Y+Nb)-Rb图解(底图据肖庆辉等,2002)

Fig. 6 Diagram of Yb-Ta and diagram of (Y + Nb)-Rb

为 $(235.8 \pm 1.4) \text{ Ma}$ ^[2-3,11,23]。说明花岗闪长斑岩形成稍早于闪长玢岩。Au1 和 Au9 矿体中绢云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $(245.6 \pm 1.0) \text{ Ma} \sim (230 \pm 2.3) \text{ Ma}$ ^[11,23],表明矿床成矿时限稍晚于花岗闪长斑岩,与闪长玢岩形成时间基本一致。

在 Yb-Ta 和 (Y + Nb)-Rb 构造环境判别图解中(图 6),样品投影点位于同碰撞花岗岩与火山弧花岗岩交汇区域和火山弧花岗岩区域,表现出岩浆弧的特征;这与微量元素原始地幔标准化的分布模式图(图 4 b)中反映的特性一致。说明花岗闪长斑岩成岩岩浆形成于俯冲背景下的陆弧环境。

综上所述,矿区花岗闪长斑岩形成于俯冲背景下的陆缘弧环境,与三叠纪西秦岭地区碰撞造山导致的陆壳大规模拆离及加厚上地壳的部分熔融有关。矿床成矿时限稍晚于花岗闪长斑岩,与闪长玢岩形成时间基本一致。

4.3 岩浆活动与金成矿关系

矿区岩浆岩主要以岩脉形式产出,受断裂构造控制明显。矿床地质特征揭示金矿化与中性岩脉关系密切,含矿部位一般为中性岩脉内,或紧贴岩脉产出,或切穿中性岩脉,或赋存在断裂破碎带内,部分中性岩脉本身即为矿体,且中性岩脉相对发育区域也是金矿化集中区,二者表现为形影相随的依存关系。中性岩脉的侵位不仅为金矿提供了热源及部分矿源,而且控制了矿床的空间产出部位^[8]。

花岗闪长斑岩常与中性岩脉伴生在一起或沿同一构造带先后侵位,岩石地球化学反映它们具

有相一致的地球化学特征^[9],花岗闪长斑岩成岩时间稍早于中性岩脉,成矿时代与中性岩脉近于同时。因此推测:花岗闪长斑岩与中性岩脉可能是同一构造-岩浆活动旋回期初始岩浆多次分异的产物。

5 结论

(1)元素地球化学特征表明花岗闪长斑岩为 I 型壳幔混源岩浆成因,其侵位严格受断裂构造控制,因而属深源浅成花岗岩(体)。

(2)矿区花岗闪长斑岩与中性岩脉(闪长玢岩、石英闪长玢岩及黑云闪长玢岩)属同一构造-岩浆活动旋回期初始岩浆多次分异的产物,岩石形成于俯冲背景下的陆缘弧环境,与三叠纪西秦岭地区碰撞造山导致的陆壳大规模拆离及加厚上地壳的部分熔融有关。

(3)矿床成矿时限稍晚于花岗闪长斑岩,与闪长玢岩形成时代基本一致。花岗闪长斑岩等脉岩沿断裂构造的侵位和扩容,为金矿的含矿流体充填、沉淀富集提供了有利的空间。

参 考 文 献

- [1] 吕新彪,曹晓峰,Mohamed Lamine Salifou Sanogo,等. 枣子沟金矿地质特征、控矿构造及物质来源探讨[J]. 矿物学报,2009(z1): 447-448
- [2] 李亮. 甘肃枣子沟金矿的矿化特征及矿床成因[D]. 中国地质大学(武汉),2009
- [3] 刘春先,李亮,隋吉祥. 甘肃枣子沟金矿的矿化特征及矿床成因[J]. 地质科技情报,2011,30(6):66-74

- [4] 曹晓峰, Mohamed Lamine Salifou Sanogo, 吕新彪, 等. 甘肃枣子沟金矿床成矿过程分析——来自矿床地质特征、金的赋存状态及稳定同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4): 1039–1054
- [5] 代文军, 陈耀宇. 甘肃枣子沟金矿床稀土元素地球化学特征[J]. 黄金, 2013, 34(9): 23–29
- [6] 陈瑞莉, 陈正乐, 伍俊杰, 等. 甘肃合作早子沟金矿床流体包裹体及硫铅同位素特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(2): 87–102
- [7] 代文军, 陈耀宇, 刘春先, 等. 甘肃枣子沟金矿床围岩蚀变特征及其与金矿化的关系[J]. 甘肃地质, 2011, 20(3): 31–36
- [8] 代文军, 陈耀宇. 甘肃枣子沟金矿区中性岩脉与成矿关系[J]. 黄金, 2012, 33(1): 19–23
- [9] 龚全胜, 代文军, 武雪梅. 西秦岭早子沟金矿含矿岩体地球化学特征及成因机制探讨[J]. 矿产勘查, 2019, 10(4): 854–862
- [10] 刘勇, 刘云华, 董福辰, 等. 甘肃枣子沟金矿成矿时代精确测定及其地质意义[J]. 黄金, 2012, 33(11): 10–17
- [11] 隋吉祥, 李建威. 秦岭夏河—合作地区枣子沟金矿床成矿时代与矿床成因[J]. 矿物学报, 2013, 52(增刊1): 346–347
- [12] 路远发. Geokit. 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459–464
- [13] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Sci Rev, 1994, 37: 215–224
- [14] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002
- [15] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992
- [16] 张成立, 王涛, 王晓霞. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 304–316
- [17] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [18] 陈衍景. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 854–865
- [19] 徐学义, 李婷, 陈隽璐, 等. 西秦岭西段花岗岩浆作用与成矿[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 76–82
- [20] Dong YP, Zhang GW, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogeny, China: review and synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences. 2011, 41: 213–237
- [21] Qin JF, Lai SC, Diwu CR, et al. Magma mixing origin for the post-collisional adakitic monzogranite of the Triassic Yangba pluton, Northwestern margin of the South China block: Geochemistry, Sr-Nd isotopic, zircon U-Pb dating and Hf isotopic evidences[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology. 2010a, 159: 389–409
- [22] 骆必继, 张宏飞, 肖尊奇. 西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 199–213
- [23] 李建威, 隋吉祥, 靳晓野, 等. 西秦岭夏河—合作地区与还原性侵入岩有关的金成矿系统及其动力学背景和勘查意义[J]. 地学前缘, 2019, 26(5): 17–31
- [24] 陈希节, 贫晓瑞, 雷敏, 等. 青海共和盆地中三叠世花岗岩组合岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 2020, 36(10): 3152–317

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GEOLOGICAL SIGNIFICANCE OF GRANODIORITE PORPHYRY IN ZAOZIGOU GOLD MINING AREA, WEST QINLING

DAI Wen-jun¹, XIE Jian-qiang², WANG Xiao-wei³

(1. *The Third Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals*

Exploration and Development, Lanzhou 730050, China;

2. *Geological Fund Management Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China;*

3. *Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: In addition to the development of a large number of neutral dykes (diorite porphyryite, quartz diorite porphyryite and black cloud diorite porphyryite), there are more acidic dykes—granodiorite porphyry. In order to understand the genesis of granodiorite porphyry and its relationship with mineralization, a systematic study of rock geochemistry was carried out in this study. The results show that the samples have higher $w(\text{SiO}_2)$ (65.02% ~ 67.31%), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ (15.31% ~ 17.62%), $w(\text{K}_2\text{O})$ (3.24% ~ 3.86%) and lower $w(\text{MgO})$ (1.59% ~ 2.93%); $\sigma = 0.56 \sim 1.88$, $A/\text{CNK} = 0.94 \sim 1.08$, it is a high potassium calcium alkaline series quasi-aluminous-peraluminous granite. The total amount of rare earths is medium ($\sum \text{REE} = 132.70 \times 10^{-6} \sim 211.96 \times 10^{-6}$), relatively rich in light rare earths, and the fractionation of light and light rare earths is obvious ($\text{LREE}/\text{HREE} = 12.50 \sim 19.12$, $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 18.62 \sim 40.65$), with a weak negative europium anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.68 \sim 0.84$); the original mantle standardized distribution pattern shows that the relative enrichment of Rb, K, Th, Ba, Nb, Ti and other elements. The tectonic environment discrimination shows the characteristics of the crust-type and crust-mantle magmatic arcs. In summary and combined with the regional geological background, it is believed that the formation of the granodiorite porphyry in the continental margin arc environment under the subduction background is related to the large-scale detachment of the continental crust and the partial melting of the thickened upper crust caused by the collision orogeny in the western Qinling area of the Triassic. Granodiorite porphyry is often associated with neutral dikes or emplaced successively along the same tectonic zone, and its diagenetic time is slightly earlier than that of neutral dikes, and its metallogenic age is basically the same as that of diorite porphyry, but slightly later than that of granodiorite porphyry. It shows that the emplacement and expansion of granodiorite porphyry and other vein rocks along the fault structure provide a favorable space for the filling of ore-bearing fluids and precipitation enrichment of gold deposits.

Key words: granodiorite porphyry; petrogenesis; geological significance; Zaozigou gold mining area; West Qinling Mountains